カメラ映像を用いた高層建物の 施工階モニタリング装置の開発

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MONITORING OF WORKING AREA ON HIGH-RISE BUILDING CONSTRUCTION SITE WITH CAMERA IMAGES

蔡 成浩 ——— * 1 水谷 亮 ——— * 2

Soungho CHAE ——— * 1 Ryo MIZUTANI ——— * 2

キーワード：
工事管理, 高度化, カメラ映像, モニタリング, 省力化

Keywords:
Process control, Improvement, Camera Images, Monitoring, Labor-saving

The authors developed a system to improve the performance of construction supervisors. The system provides an image which shows the situation of currently working top-floor to computer monitor of supervisor. Cameras are attached on the tower-crane, and the raw-images from cameras are transformed and assembled by the program. The system was used in actual site and evaluated in term of practical utility. According to the result, the authors confirmed that the system describes images of working top-floor which supervisors can recognize the situation without physical observation.

1. はじめに

建築工事では、担当者が施工状況を現地で確認しながら工事管理を行うのが一般的である。しかし、工事の規模が大きくなると、施工階への移動に時間を要し、担当者が施工階の進捗状況をリアルタイムで把握し難い問題がある。

近年、情報通信技術の発展とともに、工事管理において、カメラ映像を用いた遠隔でのモニタリング方法が普及しつつある。カメラ映像を用いた施工階のモニタリングができれば、遠隔における施工階状況の把握とともに、移動時間の短縮による工事管理の省力化が期待できる。

筆者らは、工事管理の高度化を目的に、複数のカメラをタワーレーン（以下TCと示す）に設置して施工階を撮影し、そのカメラ映像を専用プログラムで処理することで、パソコン上で施工階を俯瞰的にモニタリングするシステムを開発し、高層建物の現場に適用した。本報では、開発したシステムの概要および適用の結果を示す。

2. カメラ映像の工事管理への適用に関連する既往の研究

工事管理へのカメラ映像の活用を提案した事例は多くある。例えば、作業測定へのメモーションカメラの使用¹⁾、携帯電話とカメラによる工事進捗の報告²⁾、カメラ映像と3次元モデルによる進捗確認³⁾、画像の自動解析による工事現場の識別⁴⁾などである。これらの研究によって、単体のカメラ映像の確認や記録による工事管理の方法は提案されているものの、複数のカメラ映像を用いて施工階全体を俯瞰的にモニタリングする仕組みを実用化した事例は見当たらないのが現状である。

3. 施工階モニタリングシステム開発条件

本システムの開発は下記を条件として行った。

①カメラの設置

カメラは、TCのマストの上部に設置することにし、TCのマストの下部方向を撮影する。

②カメラ映像の送受信

現場内のパソコンでカメラ映像をモニタリングすることにし、カメラとパソコン間のカメラ映像の送受信は、現場内のLAN（Local Area Network）を用いる。

③撮影の対象

撮影する対象は躯体工事中の施工階であり、施工階は設置したカメラから直視できる最上階とする。

4. 施工階モニタリングシステムの概要

4.1 システムの全体構成

本システムは、図1のように、撮影部、映像転送部、表示部の三つの部位で構成される。

撮影部は、施工階を撮影するカメラ、撮影したカメラ映像の送受信を制御するカメラサーバーで構成される。映像転送部は、撮影部のカメラサーバーと表示部のファイルサーバーがカメラ映像を送受信するデータ通信ネットワークとデータ通信ネットワークを制御する中継器で構成される。表示部は、カメラ映像を受信するファイルサーバー、カメラ映像を処理する制御装置、処理したカメラ映像を表示するモニター、処理したカメラ映像を保存する保存装置で構成される。

¹⁾ 鹿島建設技術研究所 上席研究員
(〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²⁾ 鹿島建設機械部 グループ長

¹⁾ Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute

²⁾ PE, JP Deputy General Manager, Machinery & Electrical Engineering Dept., Kajima Corp.

図1 システムの構成

4.2 システムの構成要素の詳細

(1) 撮影部

①カメラ

レンズを施工階に向けて、TCのマストに固定する。例えば、2台のカメラを用いる場合は、図2のように、映像の撮影範囲に施工階が全て写り、なおかつ各々のカメラ映像の撮影範囲が重なるように映像の中心の位置を調整して固定する。カメラから施工階までの高さが低く、標準のレンズでは施工階が全て写らない場合は、広角レンズを使用することで、映像の撮影範囲を拡大する。しかし、広角レンズの場合は、カメラ映像の歪みが増加し、解像度が低下するなどの問題があり、最適な画角のレンズ選択が必要である。

図2 カメラの設置例

②カメラサーバー

一定の時間ごとにカメラ映像を画像ファイルの形式に変換し、その画像ファイルをファイルサーバーへ送信する。さらに、カメラ映像の閲覧機能は、データ通信ネットワークに接続したパソコンへカメラ映像を送信する。

(2) 映像転送部

LAN であるデータ通信ネットワークを用いて、撮影部のカメラサーバーと表示部のファイルサーバーの間のデータの送受信を行う。

LAN は、ケーブルを通じて有線通信を行う手法と、無線通信による手法を使用できる。中継器はケーブルの延長に用いる。

(3) 表示部

①ファイルサーバー

カメラサーバーが送信した画像ファイルを受信し、受信した画像ファイルを保存装置に保存する。

②制御装置

処理プログラムを用いて、カメラ映像のアフィン変換による透視歪みを補正し、隣り合う映像を繋ぎあわせ、施工階が俯瞰的に見える映像を作成する。透視歪みは、被写体に対するカメラの傾きにより、長方形が台形に見える現象であり、アフィン変換は、透視歪みを補正して、台形を長方形に見えるように処理する手法である⁵⁾。

手順1)元の映像で、台形に見える長方形が処理後の映像で長方形に見えるように映像のピクセル座標を設定する

凡例) (x_n, y_n) : 画像のx方向、y方向のピクセル座標

L_x, L_y : 処理後の長方形のx方向、y方向のピクセル数であり、実際の寸法に対する縦横比で決める

手順2)手順1)で設定したピクセル座標を用いてアフィン変換のための行列を求める。求めた行列を用いて映像の透視歪みを補正する。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad \cdots \text{式 1}$$

凡例) (x, y) : 元の映像のピクセル座標

(x', y') : 処理後の映像のピクセル座標

a: アフィン変換の行列の要素

手順3)補正後のカメラ映像の共通点2か所を目視で決め、その共通点がお互い重なるように隣り合う映像を繋ぎあわせる。

図3 カメラ映像の処理手順

処理プログラムは、図3の順序で実施される。まず、手順1)では、元の画像で台形に見える長方形が補正後に長方形に見えるように映像のピクセル座標を設定する。長方形のx方向とy方向の大きさは、長方形の実際の寸法に対する比率を求めて設定する。

次に、手順2)では、手順1)で設定したピクセル座標を用いてアフィン変換のための行列を求め、その行列を用いて映像の歪みを補正する。

最後に、手順3)では、補正後の隣り合うカメラ映像の共通点を2か所設定し、繋ぎあわせて1枚の映像を作成する。

③モニター

担当者が閲覧するために、制御装置で処理後の繋ぎあわせた映像を表示する。

④保存装置

カメラ映像、アフィン変換後の映像、繋ぎあわせた映像のそれぞれの画像ファイルをフォルダに保存する。

5. 現場への適用

5.1 現場の概要と機器の設置状況

本システムを、基準階面積約 1,800 m²、最大高さ約 180m の集合住宅の新築現場で適用した。現場で使用した TC は高さ約 40m の 2 台であり、施工階の上昇とともに盛り替えするクライミング型であった。

カメラは、図 4 のように、1 台の TC に 2 台ずつ合計 4 台を使用した。データ通信ネットワークは、信頼性を考慮して有線通信を基本にし、配線ができない場所は無線通信とした。有線通信の区間は、有線 LAN ケーブルを利用し、施工中の建物の 1 階から TC②のカメラまでであった。無線通信区間は、無線アンテナを利用し、工事事務所から施工中の建物の 1 階までと TC①のカメラから TC②のカメラまでであった。中継器は、施工中の建物の 1 階と TC の下部階に 1 台ずつ設置し、その間は 5 階に一台ずつ設置した。

図4 システムの設置状況

図5 カメラ映像の処理時間の間隔

5.2 適用結果

(1) 撮影部

①カメラ

画角が 180 度の全周囲レンズを持つ市販のネットワークカメラを使用し、施工階までの距離が最短で約 10m の場合も施工階を写すことができた。カメラへの電力の供給は、PoE(Power over Ethernet)

給電を使用し、有線 LAN ケーブルのみの配線とした。カメラの固定は、防水ケースにカメラ本体を収納し、TC のマストから約 1m 離れた位置に仮設用の単管パイプを利用することで、マストに隠れて死角になる施工階の部位を最小限にした。

②カメラサーバー

カメラ①からカメラ④までのカメラ映像は、施工階が写る領域のみが JPEG 形式の大きさ 640×460 ピクセルの画像ファイル（容量約 51kb）に変換され、図 5 のように、4 枚同時に 1 秒間隔に送信された。それは、画像ファイルの容量を減らし、送信間隔を長くすることで、データ通信ネットワークの通信負荷を軽くするためである。

手順1)4台のカメラの元の映像

手順2)アフィン変換

手順3)繋ぎあわせた映像

図6 カメラの元の映像とモニターへの表示画像

(2) 映像転送部

本現場では、工事の進捗とともに TC の上昇を行うため、上昇時の配線作業を考慮し、中継器を設置して LAN ケーブルの接続をやすくした。さらに、TC①のカメラは無線通信を用いることで、TC 間の LAN ケーブル配線による断線などの危険を無くした。TC①と TC②のカメラサーバーからの画像ファイルの送信速度はほぼ同じであり、無線通信による遅延は見られなかった。

(3) 表示部

工事事務所に設置したノート型の PC を 1 台用いて、ファイルサーバー、制御装置、モニター、保存装置の機能を行った。使用した PC の OS は Windows7Pro、CPU は intel i5 であった。

制御装置は、プログラムを用いて、図 5 のように、5 秒間隔に 4 つのカメラ映像を読み込んでアフィン変換と繋ぎあわせを自動で行った。ただし、TC の上昇によってカメラの位置が変化した最初は、アフィン変換の行列の同定と隣り合う映像の共通点を指定した。

モニターは、PC の画面を利用し、図 6 のように、繋ぎあわせと同時にその映像を表示した。担当者には、5 秒間隔の更新でも、施工階の状況の把握に問題がないことを確認した。

保存装置は、繋ぎあわせた映像を容量が約 140kb の画像ファイルとし、10 分間隔で記録した。記録の間隔は、最短で 5 秒間隔も可能であるが、施工階の部材取付けのサイクルタイムに鑑み、各部材の取付け順序が繋ぎあわせた画像から確認できる範囲で決められた。

6. システムの有効性の検討結果

本システムの現場での運用および、工事管理へ活用した現場担当者の意見に基づき、その有効性と課題を下記に示す。

(1) システムの運用

①使用機器の設置

本現場では、カメラと LAN ケーブルなどの設置を TC が組み上がった状態で行ったため、高所でのカメラの固定作業があった。TC を組み立てる前に地上において、予めカメラを設置することができれば、設置作業の安全性の向上と省力化が期待できる。

データ通信ネットワークの配線作業は、無線通信により無くすことができた。しかし、建物が高層になると、地上からの電波が届かない、電波の干渉により通信の不安定になるなどの問題点がある。本現場のように、有線配線を基本にし、配線が出来ない場合は、電波の通信環境が安定しているかを確認し、無線通信を計画するのが望ましい。

②使用機器の管理

TC に設置した機器は修理が難いため、故障が少ないものを選定する必要がある。本現場は、カメラには駆動部がなく、PoE 給電により電源の配線を無くし、防水ケースを使用したため、運用期間中の故障は発生しなかった。

現場は、LAN ケーブルの断線や接続不良が発生しやすい環境である。工事事務所の PC から遠隔で断線した箇所を把握できる機能を持つ中継器を利用することも有効と考えられる。

③カメラ映像の処理と表示

アフィン変換後に繋ぎあわせた映像は、施工階の作業者の動きを確認できる程度であり、施工階の進捗状況を把握するには十分な精度であった。また、処理プログラムによるモニターへの 5 秒間隔の更新には遅延がなく、進捗状況も違和感なく確認できた。

カメラ映像の品質に関しては、使用したカメラは自動絞りであったため、それぞれが撮影範囲の明度のむらにより、繋ぎあわせ映像にコントラストの差が生じる場合があった。

本現場では、施工階の平面を中央で分割して工区割を行い、各工区間の部材の取付けは時間差があった。そのため、工事中に施工階の高さの差が生じた場合は、繋ぎ合わせた映像の中央部に位置ずれが生じ、その付近の状況を確認し難いことがあった。

(2) 工事管理への適用

①作業進捗の管理

施工階における、先行搬入材の配置、仮設部材の位置、機材の設置などの計画は平面図上で行うことが多く、平面図と同じような映像で実際の位置関係を確認できるので、計画に対しての相違点を把握しやすくなった。さらに、平面図と同じ比率の映像であるため、床版の敷き、鉄筋の配筋、コンクリートの打設など作業進捗度をリアルタイムで判断できた。

②揚重作業の安全性向上

揚重作業時に、荷卸しヤードからでも施工階の全体状況をモニターで確認しながら指示ができれば、安全性や作業性の向上が期待できる。また、2 台の TC の動きを同じモニターで同時に確認できるため、近接作業時の吊り荷の位置関係が安全であるか判断できた。

③非常時の対応

地震や台風時に、事務所に居ても施工階の異常が早期に把握できるので、高層の施工階に行くのに時間が掛かる場合でも、応急処置までの時間短縮が期待できる。

④作業の生産性の評価

一定間隔に映像を保存して分析することで、作業の順序、部材の取付け時間、作業員の位置、作業量などを算出し、詳細な生産性の把握による作業改善ができる。特に、今までの単体のカメラ映像では死角ができるために、捉えることが難しかった作業者の動線や部材の移動経路の記録と把握ができた。今までは目視で行っていた施工階の工事管理が現場事務所において実施可能となり、移動時間の短縮につながった。

7. おわりに

本報では、工事管理の高度化を目的に、カメラ映像による施工階のモニタリングシステムを開発し、現場適用による実用化検討を行った。TC に取付けた 4 台のカメラの映像を用いた施工階の表示は問題無く実施され、提案した仕組みが実際の現場において問題なく稼働できることを確認した。

現場担当者による運用の結果、目視や単体のカメラ映像では難しかった、施工階全体における作業進捗や生産性の分析のための映像を得ることができた。以上の結果から、本システムを使用することで、工事管理の高度化の可能性を確認した。

今後、TC を利用する工事現場への展開を図るとともに、TC を設置しない規模の工事現場でのシステムを開発する予定である。

参考文献

- 1) 森一、汐川孝：建築生産における標準時間に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 279-280，1973. 10
- 2) 澤田晃也、大寺重則：カメラ付き携帯電話による施工状況報告支援システムの開発，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 781-782，2005. 9
- 3) 金炳垠、ほか 2 名：建築工事における写真画像と VR 画像を用いた進捗に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第 599 号，pp. 119-126，2006. 1
- 4) 櫻井芙美、三田彰：カメラ画像の動特性に着目した建設工事の自動認識，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 459-460，2009. 8
- 5) Richard Hartley, Andrew Zisserman: Multiple View Geometry, Cambridge University Press, 2000

[2014 年 2 月 4 日原稿受理 2014 年 4 月 15 日採用決定]